

I-B 194 等価線形および非線形解析による不整形盛土地盤の地震応答比較

清水建設（株） 正会員 藤川 智, 福武毅芳  
 中部電力（株） 正会員 上田 稔, 依田 眞  
 中電工事（株） 正会員 恒川和久

1 はじめに 地震時の地盤の非線形性を取り入れた解析としては、等価線形解析と逐次非線形解析（以下、非線形解析）が用いられることが多い。非線形解析は時刻歴解析であり、時々刻々と地盤の接線剛性を追跡していくため高精度な解析が可能となる。これに対し、等価線形解析は周波数領域の解析であり、与えられた剛性と減衰による計算結果が許容誤差内に収まるまで収束計算を行う近似的な手法である。しかし、等価線形解析でも最大せん断ひずみが $10^{-3}$ 程度以下で、地盤の卓越周期付近を議論する限りにおいて十分適用でき<sup>1)</sup>、実務で多く用いられている。これまでも、等価線形解析および非線形解析の適用性や、両者による解析結果の比較に関する研究が多数行われてきた<sup>2)</sup>。これらによると、加速度に関しては等価線形解析の方が大きくなり、地盤のせん断ひずみに関しては非線形解析の方が大きくなる傾向が見られる。しかしながら、これらの多くは一次元の解析であり、二次元モデルに対する両解析結果の比較はほとんど行われていないようである。成層地盤に対しては一次元解析で十分であるが、山間部の盛土部と切土部が入り組んだような地盤では不整形性の影響が現れ、二次元解析による検討が望まれる。本研究では、二次元モデルに対し等価線形解析とR-Oモデルを二次元に拡張した非線形解析<sup>4)</sup>を実施し、その結果を比較する。

2 解析条件 解析モデルと地盤物性を図1に示す。盛土部の土質は砂礫であり、そのひずみ依存性 ( $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ 関係)は文献3)を参考に設定した。非線形解析において、R-Oモデルのパラメータはこのデータに基づき、基準ひずみ  $\gamma_{0.5} = 2.37 \times 10^{-4}$ 、最大減衰定数  $h_{max} = 0.20$ と設定した。また、初期せん断応力の作用方向に残留ひずみが蓄積していくように応力-ひずみ関係を修正している<sup>5)</sup>。等価線形解析に用いる  $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ 関係はR-Oモデルから設定される値に一致させた。有効ひずみは最大ひずみの65%とした。境界条件は、等価線形解析では側方エネルギー伝達境界、底面粘性境界とし、非線形解析では側方、底面ともに粘性境界とした。従って、両解析結果の違いは、主に解析手法と境界条件の違い、および残留ひずみの評価の有無に起因するものである。岩盤部は弾性体として扱い、減衰は5%とした。非線形解析では剛性比例型のレイリー減衰を用いて、岩盤部のみ的一次固有振動数(3.3Hz)において5%の値を与えた。固有値解析による解析モデルの一次の固有振動数は3.0Hzである。入力地震波は2ケースを考え、1968年十勝沖地震幌満橋記録(橋軸成分)と1983年日本海中部地震七峰橋記録(橋軸直角成分)とした。入力波の卓越振動数は2波とも4.2Hzである。入力最大加速度は当該地盤における歴史地震75年期待値で180Galとする。図1に示す盛土深さが最大となる位置の岩盤 ( $V_s = 1340$ m/s)を解放基盤とし、その位置で180Gal(2E)として一次元等価線形解析(SHAKE)でデコンボリューションし、解析モデル底面での上昇波(E)を定義した。

3 解析結果 図2に地表面加速度の最大値の分布を示す。入力波や位置に依らず等価線形解析の方が非線形解析より大きな加速度を示している。図2において、左端部は主に地盤の不整形性の影響により応答が大きくなったものと考えられる。これに対し、右端部では不整形性の影響に加え盛土地盤の非線形化により応答が抑制される効果が含まれ、左端部ほど大きな応答になっていないものと考えられる。図3には、切土部(図2の断面A)と盛土部(断面B,C)の鉛直断面における最大加速度分布を示す。切土部では、等価線形解析の方が大きな加速度を示しているが、盛土部では非線形解析の方が大きいところの一部が見られる。入力波による応答の違いは、切土部ではあまり見られないが盛土部では大きく、特に盛土斜面に近い断面Cでは大きくなっている。図4にはせん断ひずみの最大値の深さ方向の分布を示す。盛土部では地盤レベルが深くなるほどひずみが大きくなっている。これは、 $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$ 関係の拘束圧依存性(拘束圧が大きくなると非線形化しにくくなる傾向)を考慮していないためである。切土部ではひずみレベルが小さく、両解析結果は同程度のひずみであるが、盛土部では非線形解析の方が大きい。断面BとCの比較では、ひずみレベルが大きい断面Cの方が両解析法の差が大きくなっている。等価線形解析による最大せん断ひずみは盛土部で $\gamma_{max} = 0.05\%$ 程度であり、適用範囲内であると考えられるが、ひずみに関して両解析結果

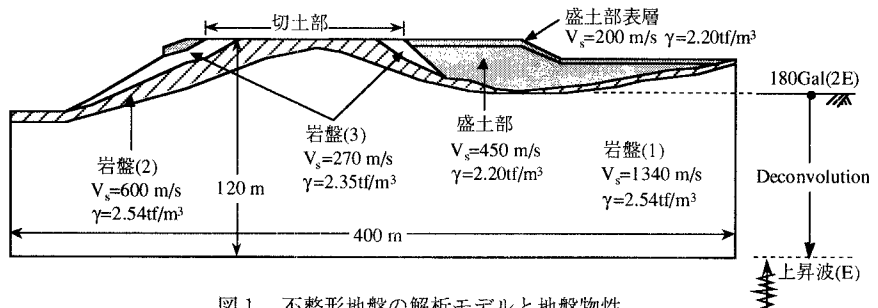


図1 不整形地盤の解析モデルと地盤物性

の差はやや大きいと思われる。図5に非線形解析による盛土下部の要素a(図2参照)の応力-ひずみ関係を示す。初期せん断応力の作用方向にひずみが残留していく様子が伺える。このため、初期せん断応力の大きな盛土下部で残留ひずみが蓄積し、等価線形解析との差が大きくなったと考えられる。また、応力-ひずみ曲線のループの偏りにより減衰(1サイクル当たりのエネルギー損失)が小さく評価されるため加速度が大きくなり、盛土端部で等価線形解析との差が小さくなっているものと考えられる。

**4 まとめ** 二次元不整形盛土地盤に対する等価線形解析と非線形解析を行い、応答結果の違いを考察した。加速度に関しては等価線形解析が大きくなり、せん断ひずみに関しては非線形解析の方が大きくなる傾向が見られた。ただし、非線形解析における残留ひずみの効果を除いて、解析手法の違いだけに着目すれば、加速度の差はより大きく、ひずみの差はもっと小さくなるものと考えられる。本研究で用いたモデルや解析条件では上述のような結論が得られたが、一般的な結論を導き出すならば条件を変えたパラメータスタディーが必要と考えられ、今後の課題としたい。

**参考文献** 1) 翠川三郎「強震時にみられる地盤特性の非線形性」,地震,第46巻,pp.207-216,1993.  
 2) 例えば,吉田望,田蔵隆,鈴木英世「地盤の非線形地震応答解析手法の比較」,第23回地震工学研究発表会,1995.7. 3) 今津雅紀,福武毅芳「砂礫材料の動的変形特性」,第21回土質工学研究発表会,pp.509-512,昭和61年. 4) K.Fukutake, A.Ohtsuki, M.Sato and Y.Shamoto, 'Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test', Earthquake eng. struct. dyn. 19, 977-992,1990. 5) 藤川智,福武毅芳,大槻明「初期せん断作用時の応力・ひずみ関係と加振中における残留変形解析」,第27回土質工学研究発表会,1992.

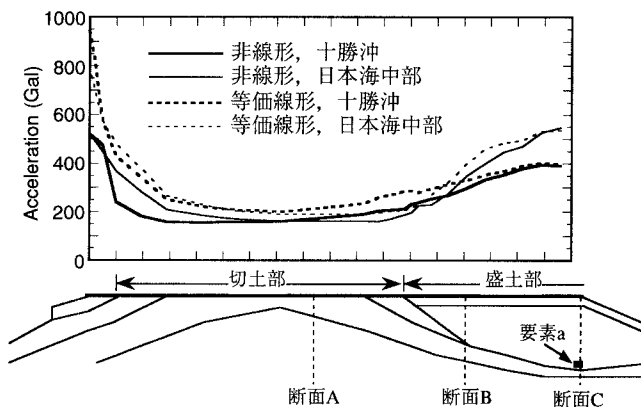


図2 地表面の最大加速度分布

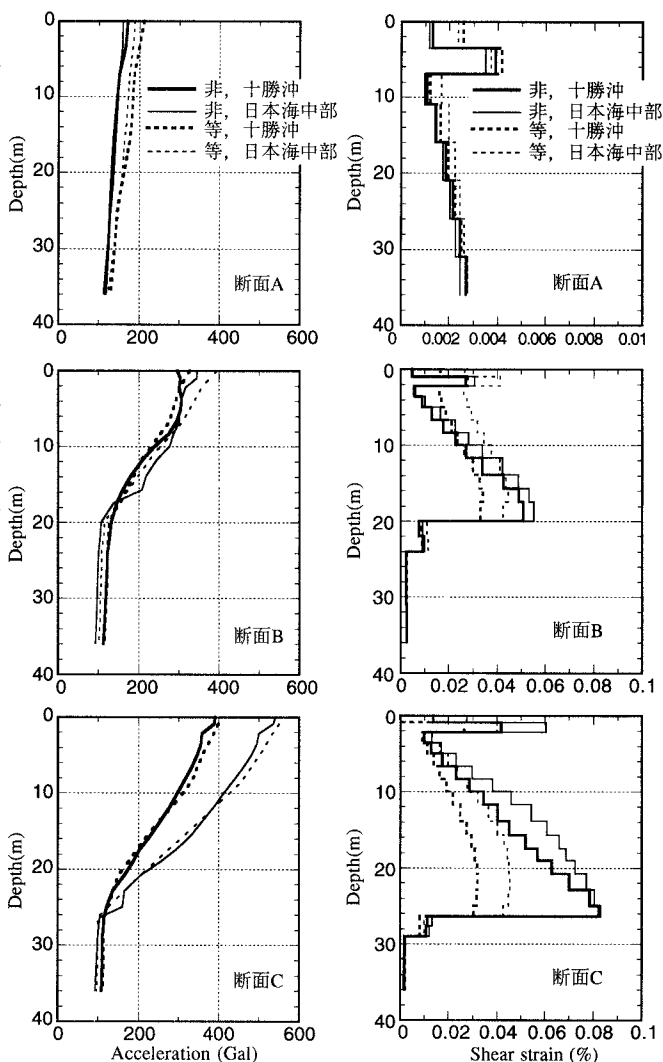


図3 最大加速度分布

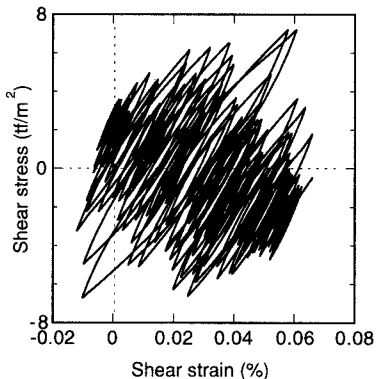


図5 非線形解析による盛土内要素aの応力-ひずみ曲線

図4 最大せん断ひずみ分布